

EINFLUSS DER ZEICHENSCHÄRFE AUF DIE
AKKOMMODATION DES MENSCHLICHEN AUGES

ANDREAS KORGE

1985

*Less
München*



Aus dem Institut für Arbeitsphysiologie der
Technischen Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. W. Müller-Limmroth

EINFLUSS DER ZEICHENSCHÄRFE AUF DIE
AKKOMMODATION DES MENSCHLICHEN AUGES

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Andreas Korge
aus
Konstanz
Jahr
1985

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. H. Krueger
Mitberichterstatter: Prof. Dr. E. Pöppel
Dekan: Prof. Dr. W. Spann
Tag der mündlichen Prüfung: ..27.6.1985.....

Inhalt

<u>1. Einleitung</u>	1
<u>2. Methodik</u>	5
2.1. Versuchsanordnung.....	5
2.1.1. Laseroptometer.....	7
2.1.2. Testzeichen.....	9
2.1.3. Metrik.....	11
2.2. Experimente.....	13
2.2.1. allgemeine Erläuterungen.....	13
2.2.2. Versuchsdurchführung.....	15
2.2.3. Messung der Ruheakkommodation.....	16
2.2.4. Experiment-Varianten.....	16
2.3. Versuchspersonen.....	16
2.4. Auswertungsmethoden.....	17
<u>3. Ergebnisse</u>	18
3.1. Verlauf der Originalschwärzungskurven.....	18
3.2. Schwärzungsverhalten bei zunehmender Verunschärfung...	21
3.3. Einfluß der Sehentfernung.....	23
3.4. Einfluß der Testzeichengestalt.....	27
3.5. Überprüfung der Ergebnisse an Kontrollpersonen bei 3 dpt.....	30
3.6. Vergleich von monokularer und binokularer Darbietung..	33
<u>4. Diskussion</u>	35
<u>5. Zusammenfassung</u>	46
<u>6. Literatur</u>	48

Meinen Eltern



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554826_0112

1. Einleitung

Die moderne Bildschirmtechnik hat in der Industrie seit langem Einzug gehalten und der Begriff des "Bildschirm-arbeitsplatzes" ist aus der Arbeitswelt nicht mehr wegzudenken. Auch in der Medizin findet der Bildschirm z.B. im Rahmen der Ultraschall- und Computertomogrammdiagnostik Verwendung.

Die heute eingesetzten Bildschirme haben als Anzeigemedium im allgemeinen eine Kathodenstrahlröhre. Diese hat jedoch die nachteilige Eigenschaft, an der Glasoberfläche des Bildschirmes störende Reflexe zu erzeugen. Eine mögliche Gegenmaßnahme hierbei ist die Aufrauhung der Oberfläche, wie sie heutzutage bei der Mehrzahl der heimischen Fernseher angetroffen wird. Die Aufrauhung der Oberfläche bewirkt eine diffuse Reflexion des auffallenden Lichtes und führt damit, gewünscht, zu einer Reduktion der Leuchtdichte und der Schärfe von Reflexbildern.

Gleichzeitig wird aber auch die Schärfe des eigentlichen Informationsträgers und damit der dargebotenen Information an sich gemindert. Wenn dieser Effekt, der eine Funktion des Abstandes zwischen Leuchtstoffschicht und aufgerauhter Glasoberfläche ist, auch wesentlich geringer als derjenige für das Streulicht ist, wird er dennoch von der betrachtenden Person als unangenehm wahrgenommen. Damit jedoch stellt sich die Frage, ob durch die Unschärfe der dargebotenen Information auch die menschliche Akkommodation negativ beeinflusst wird. Wenn dieses der Fall wäre, muß dieser Effekt zu einer zusätzlichen, physiologisch bedingten Unschärfe des Retinabildes führen.

Die Akkommodation des menschlichen Auges steht unter dem Einfluß verschiedener Akkommodationsparameter, die

vielleicht simultan benutzt werden (CRANE, 1966). So ist sie einerseits von den diversen Eigenschaften des Auges abhängig, wie z.B. der sphärischen bzw. chromatischen Aberration (IVANOFF, 1949; FINCHAM, 1951) und der Konvergenz (FINCHAM, 1953; HEATH, 1956a; KRUEGER, 1968). Andererseits wirken Informationen ein, die durch das betrachtete Objekt geliefert werden, wie z.B. Größe (ITTELSON und AMES, 1950), Helligkeit und Raumfrequenzverteilung (CHARMAN und TUCKER, 1977; OWENS, 1980).

In der Hauptsache wird der Regelkreis der Akkommodation jedoch durch die Schärfe des Netzhautbildes stimuliert (ALLEN, 1955; ALPERN, 1958; WESTHEIMER, 1966; TOATES, 1970 u. 1972). Diesen Vorgang kann man einmal als "statischen" Vorgang ansehen im Sinne einer absoluten Schärfemessung mit Sollwertabweichungen, zum anderen aber auch als "dynamischen" Vorgang, bei dem das Eingangssignal durch Regelschwingungen erzeugt wird. Hierfür könnten die der Linsenbrechkraft ständig überlagerten Schwingungen sprechen, die z.B. bei den konvergenten Augenbewegungen nicht zu finden sind. Das dynamische Regelsignal würde den Akkommodationsmechanismus auch in die Lage versetzen, auf ein unscharfes Sehobjekt akkommodieren zu können.

Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses einer Testzeichenverunschärfung auf die Akkommodation führte bereits FINCHAM (1951) durch. Er verwendete eine statische Meßmethode und folgerte aufgrund der negativen Ergebnisse, daß diese Art der Verunschärfung keinen wesentlichen Akkommodationsstimulus liefere.

Ganz im Gegensatz dazu gelangten STARK und TAKAHASHI (1965), die die Akkommodationsmuskulatur ihrer Testpersonen lähmten und diese mit einem Auge-Hand-Analog zur manuellen Refraktionskorrektur ausstatteten, zu der Annahme, daß Testzeichenunschärfe das Eingangssignal, d.h.

den entscheidenden Stimulus, für die Akkommodation darstelle.

Zwischen diesen beiden Antipoden stehen die Untersuchungen und Ergebnisse von SMITHLINE (1974). Es gelang ihm mit Hilfe dynamischer Meßverfahren unter Benutzung eines Infrarot-Optometers der Nachweis, daß die Unschärfe ein an sich notwendiger Akkommodationsstimulus ist. Aus dem Fehlen einer Akkommodationsantwort bei bloßer Verunschärfung des Testobjektes unter Ausschalten anderer Akkommodationsreize schloß er, daß eine Testzeichenverunschärfung per se jedoch nicht ausreiche, den Akkommodationsvorgang zu aktivieren.

PHILLIPS und STARK (1977) zeigen in ihrer Arbeit, daß - als wesentliche Basisvoraussetzung - die durch Defokussierung auf der menschlichen Retina erzeugte Unschärfe und die durch Verunschärfung eines Testobjektes entstandene Unschärfe einander äquivalent sind. Damit würde also auch eine Unschärfe des Objektes allein genügen, um als einzelner Akkommodationsstimulus zu wirken. Somit wäre die Unschärfe der ausreichende neurologische Stimulus der Akkommodation.

Wenn nun die Unschärfe des Testzeichens auf den Vorgang einen realen, wahrscheinlich sogar dominierenden Einfluß hat, stellt sich die Frage, ob die Akkommodationsantwort bei zunehmender Unschärfe hierbei einem "Alles-oder-Nichts"-Prinzip folgend reagiert; damit würde von einem bestimmten Schwellenwert ausgehend mit jedem Unschärfegrad unabhängig von einem Unschärfegradienten dieselbe Akkommodationsantwort erzielt werden. Dem gegenüber besteht die Möglichkeit, daß das Auge, verschiedenen Unschärfestufen angepaßt, imstande ist, im Sinne einer Gradierung entsprechend einer differenzier- ten Verunschärfung zu akkommodieren.

Jüngere Untersuchungen von HAMERLY und DVORAK (1981) zeigen, daß das menschliche Auge zu einer äußerst genauen Differenzierung fähig ist. So gelingt die Unterscheidung "scharf-unscharf" schon, wenn die sog. "Eckenübertragungsbreite" (Leuchtdichte zwischen 10% und 90%) im Bereich von 25 Bogensekunden liegt. Mit dem geringen Wert von 5-10 Bogensekunden ist die Differenzierungsfähigkeit zwischen zwei unscharfen Testzeichen sogar noch wesentlich genauer möglich.

Alle vorliegenden Arbeiten untersuchten bisher nur, ob und mit welcher Wertigkeit ein unscharfes Testzeichen imstande ist, als Akkommodationsreiz zu wirken, oder gingen der Frage nach der inter- bzw. intraindividuellen Unterscheidungsfähigkeit von scharfen und unscharfen Testzeichen nach. Das Reaktionsverhalten der Akkommodation bei verschiedenen Unschärfegraden blieb dabei unberücksichtigt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mit Hilfe einer subjektiven, dynamischen Meßmethode den Einfluß der Kantenschärfe eines Testzeichens und damit die Auswirkungen einer kontinuierlich progredienten Verunschärfung auf die Akkommodation des menschlichen Auges zu klären. Dazu soll gleichzeitig sowohl die Abhängigkeit von der Testzeichen-gestalt als auch der Einfluß der Testzeichenentfernung untersucht werden.

2. Methodik

Die Versuchsanordnung besteht im wesentlichen aus einem Laseroptometer und einer Testzeichenanordnung, welche dem Betrachter monokular oder binokular dargeboten werden kann.

Eine monokulare Betrachtungsweise wurde gewählt, um korrigierende Einflüsse der Konvergenz auf die Akkommodation auszuschalten (ALPERN, 1969). Laseroptometer und Testzeichen sind auf einer der optischen Achse entsprechenden Gleitschiene befestigt und können beliebig gegeneinander verschoben werden.

2.1. Versuchsanordnung

Im Laseroptometer liefert ein He-Ne-Laser (1/2 mW; Abb. 1, LA) einen roten, monochromatischen Lichtstrahl (633 nm), der mittels zweier Umlenkprismen P durch ein Mikroskopobjektiv M (1/20) auf einen Verschluss V projiziert wird. Der weitere Strahlenverlauf führt über eine Linse L und einen Oberflächenspiegel S_1 durch einen Strahlteiler-Spiegel S_2 (1:1) auf eine sich drehende, reflektierende Trommel T und läßt dort ein Interferenz-Punktmuster (Granulation) entstehen. Dieses helle, granulierte Feld wird über einen Strahlteiler-Spiegel S_3 , eine Optometerlinse O (Achromat; $f=100$ mm) und S_2 betrachtet. Die vordere Hauptebene des Auges liegt hierbei im Brennpunkt der Optometerlinse.

Innerhalb des Laseroptometers kann die Entfernung zwischen einem aus Trommel, S_1 und S_2 bestehenden fahrbaren Schlitten und der Optometerlinse O elektromotorisch vom Versuchsleiter oder der Versuchsperson selbst verändert werden. Dadurch wird die Granulation von dem Beob-



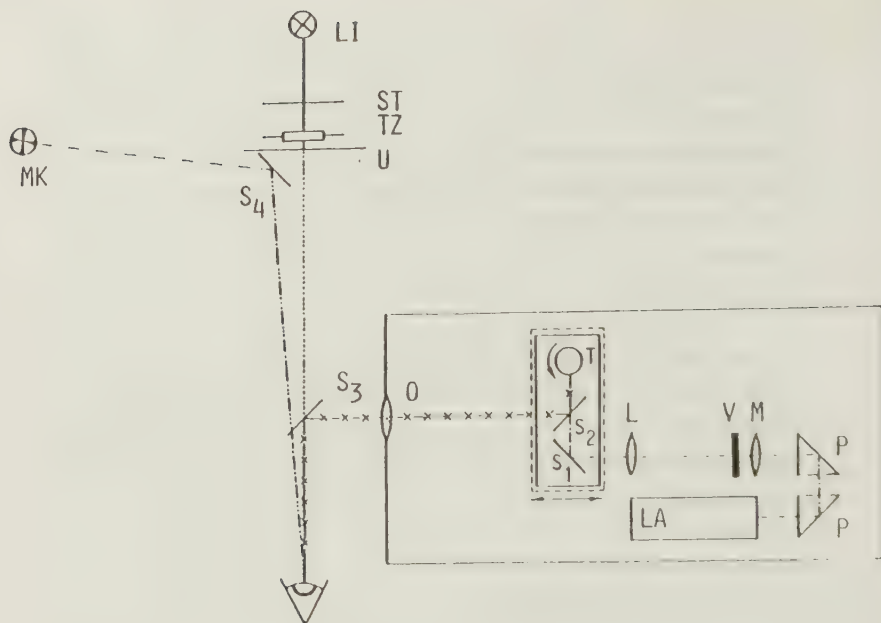


Abb. 1 Schema der Versuchsanordnung

LA: Laser; P: Prisma; M: Mikroskopobjektiv (1/20);
V: Verschluß; L: Linse; $S_{1,4}$: Oberflächenspiegel;
 $S_{2,3}$: Strahlteiler-Spiegel (1:1); T: Trommel;
O: Optometerlinse; U: Umfeldblende; TZ: Testzei-
chen; ST: Streuscheibe; LI: Lichtquelle; M: Mal-
teserkreuz

— — — — — verfahrbare Einheit mit T, S_1 , S_2

- - - - - Meßstrahlengang

-x-x-x- Beobachtungsstrahlengang

achter in verschiedenen Entfernungen gesehen. Die Verän-
derung kann an einer Skala direkt abgelesen werden.

Der Verschluß V wird mit Hilfe einer Drucktaste betä-
tigt; je nach beabsichtigter Darbietungsform ist das La-
serlichtbündel entweder primär nicht sichtbar und nur
kurzzeitig (0-650 msec) durch Öffnen des Verschlusses

auf der Retina abgebildet oder eben umgekehrt (permanent sichtbarer Laserstrahl mit kurzfristiger Unterbrechung).

Das Testzeichen TZ, in einem Diahalter fixiert, wird von hinten von einer Halogenlampe LI (50 W) durch eine Streuscheibe ST mit konstanter Leuchtdichte erhellt (Eliminierung der Leuchtdichteveränderung als Akkommodationsstimulus; FRY, 1955; ALPERN, 1958). Auf der der Versuchsperson zugewandten Seite wird das Zeichen von einer großen, gleichmäßig schwarzen Umfeldblende U umgeben, deren Kanten verunschärft sind, um jeden Anhaltspunkt für die Sehentfernung zu unterdrücken. Hiermit werden ein neutrales Umfeld geschaffen und irritierende Lichteinflüsse vermieden.

Ebenfalls zur Versuchsanordnung gehört als zweites Sehhjekt ein in einer Sehentfernung von 2m angebrachtes Malteserkreuz, welches die Versuchsperson über Spiegel S_h fixieren kann. Es ermöglicht die Rückführung des Auges in die Akkommodationsruhelage, um einer Fixierung auf einen einmal eingestellten Wert vorzubeugen.

Die Messung eines Akkommodationszustandes erfolgt somit durch Betrachtung eines Testzeichens bei gleichzeitiger Granulationsdarbietung.

2.1.1. Laseroptometer

Akkommodationsmessungen können mit konventionellen Sehzeichen (z.B. Landolt-Ringe, Snellen-Zeichen, Symbole) durchgeführt werden. Eine neuere Methode nutzt die Erkenntnis aus, daß der Akkommodationszustand des Auges mit Hilfe einer von einem kohärenten Laserstrahl erzeugten Granulation gemessen werden kann (SINCLAIR, 1965; KNOLL, 1966; HENNESSY und LEIBOWITZ, 1970; GRIMM, 1976). Hierbei entwirft der Laserstrahl über ein diffus reflektie-

rendes Medium, z.B. eine Aluminiumtrommel, auf der Retina der betrachtenden Versuchsperson ein Interferenz-Punkt-muster, welches unabhängig von jedem Akkommodationswert zu jedem Zeitpunkt scharf ist. Die diffuse Reflexion des Laserlichtes wird somit als körnige Struktur wahrgenommen. "Diese körnige Struktur kommt dadurch zustande, daß von der reflektierenden Fläche sekundäre Kugelwellen ausgehen, die auf Grund der Kohärenz des Laserlichts interferieren. Die unregelmäßige Verteilung der Wellenzentren auf der diffus reflektierenden Fläche bedingt eine unregelmäßige Verteilung der beobachteten Granula, die wir in ihrer Gesamtheit als Granulation bezeichnen."(GRIMM, 1977).

Eine Akkomodationsmessung erfolgt durch die Relativbewegung des Beobachters zur Beobachtungsebene oder, wie in dieser Arbeit, der reflektierenden Aluminiumtrommel.

Scheint das Granulationsmuster auf der Retina zu "fliegen", befindet sich das Auge im Zustand der Fehlakkommodation. Bei Unterakkommodation bewegt sich die Granulation in der Drehrichtung der Trommel, bei Überakkommodation entgegengesetzt. Ein Stillstand der Granulation zeigt an, daß das Auge für den zu betrachtenden Punkt maximal akkommodiert hat.

Der Vorteil dieser Meßmethode ist ihre Unabhängigkeit vom Auflösungsvermögen des Auges des Betrachters und damit vom Sehobjekt bzw. Kontrast.

Die Eichung des verwendeten Laseroptometers erfolgte mit 3 Personen mit unterschiedlichen Refraktionswerten (Hyperopie, Emmetropie, Myopie). Nach Lähmung des Akkomodationsmuskels des Auges (Zykloplegie mit Zyklo-lat, 1 Tropfen in den Bindehautsack, Nachtropfung nach 45 Minuten) wurde der Refraktionszustand mit Phoropter und Refraktometer (RODENSTOCK) subjektiv und objektiv ermittelt und die Einstellung des Optometers gemessen. Daraus wur-

den die Eichfaktoren berechnet. Die Verwendung des Zyklusplegikums schaltet hierbei störende Akkommodationsschwankungen aus.

2.1.2. Testzeichen

Als Testzeichen wurden nicht artifizielle Sinusgitter, die nur für den Eingangsbereich des peripheren visuellen Kanals relevant sind, verwendet, sondern reale, u.a. radial- oder achsensymmetrische Symbole, nämlich ein weißer Ring oder ein Balken auf schwarzem Hintergrund (= "positiver" Kontrast) sowie deren inverse Bilder (= "negativer" Kontrast) und ein schwarz-weißes Halbfeld (Abb. 2).



Abb. 2 verwendete Originaltestzeichen

Die Symbole mit im Original 5 mm großen Ringen und Balken wurden in einem Verkleinerungsmaßstab von 1:5 auf einen Film (Agfa Ortho 25) abphotographiert (Aufnahmeentfernung ca. 0.50 m). Zur Herstellung der Unschärfe der Zeichen wurde diesen Ausgangsdiapositiven eine streuende Mattscheibe (Schmirgelkörnung 600) in 11 verschiedenen Abstandsstufen von jeweils 1 mm vorgesetzt und für jede dieser Unschärfestufen ($S_0 - S_{10}$) ein Negativ angefertigt. Mit zunehmendem Abstand der Streuscheibe nimmt dabei der Grad der Unschärfe und damit der Schwärzungsverlauf der Kanten zu.

In der Optik beschreibt die optische Dichte D die Ver-

ringerung der Transmission beim Durchgang durch ein Medium. In der Photographie wird die optische Dichte D als Schwärzung S bezeichnet. Diese ist definiert als der dekadische Logarithmus des Quotienten der Intensität vor (I_0) und nach (I) dem Durchgang durch das Medium, d.h.:

$$S = \log I_0 / I$$

$$\text{bzw. } S = \log 1/\tau \quad \text{mit } \tau = \text{Transparenz} \\ = I/I_0$$

Es ist erkennbar, daß die Transparenz "100%, 10%, 1%..." der Schwärzung "0, 1, 2..." (Schwärzungseinheiten SE) entspricht.

Die Schwärzung kommt in der sog. Schwärzungskurve zum Ausdruck. Diese Kurve ist sozusagen die "nichtlineare Kennlinie des Empfängers" (MÜTZE, 1972) und stellt graphisch den Zusammenhang zwischen der Schwärzung S und dem dekadischen Logarithmus der Belichtung H dar (Abb. 3:

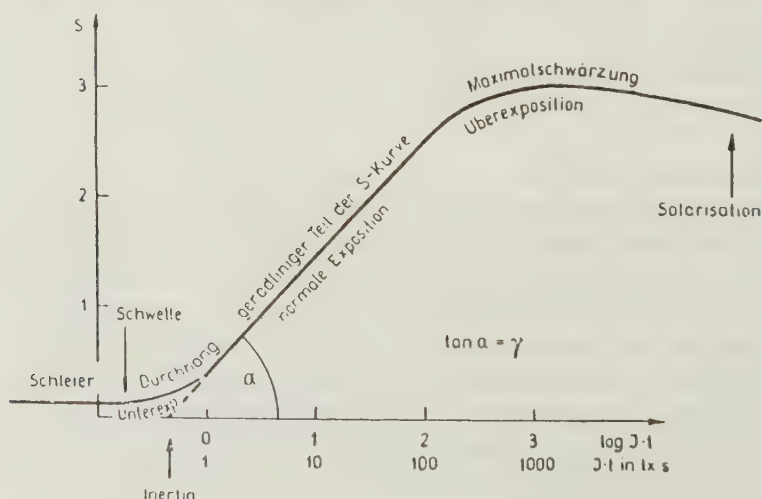


Abb. 3 Verlauf der Schwärzungskurve eines Films (aus MÜTZE, 1972)

Verlauf einer Schwärzungskurve). Die Steigung (Gradation) der Schwärzungskurve zeigt dabei den Bereich zwischen dem Zustand minimaler und maximaler Bildschwärzung, d.h. eine dem Beobachter subjektiv als unscharf erscheinende, mehr oder weniger graue Übergangszone.

Diese Intensitätsabnahme des Lichtbündels beim Durchgang durch die photographische Schicht wurde quantitativ mit einem Mikrophotometer (ZEISS, Jena) aufgezeichnet; die Frequenz des Frequenzgenerators, Papiervorschub und Empfindlichkeit des Schreibers sowie die Spaltbreite des Mikrophotometers wurden konstant gehalten.

2.1.3. Metrik

Für die gesamte Metrik der Betrachtung gilt als Voraussetzung, daß als Bezugspunkt der Sehwinkel φ angenommen wird (Abb. 4).

Da die Testzeichen in verschiedenen Entfernungen dargeboten werden, ist es, um vergleichende Betrachtungen anstellen zu können, notwendig, eine Referenzentfernung festzulegen. Hierzu bietet sich eine in 1 m Entfernung liegende Ebene an, da diese gleichzeitig der mittleren Ruhelage der menschlichen Akkommodation entspricht.

Als Meßgrößen dienen:

1. der Schwärzungsgradient α_s der Tangente an den Schwärzungsverlauf, der ebenfalls für jede Testzeicheneinstellung auf einen (Referenz-) Schwärzungsgradienten α_{1m} in 1 m Entfernung bezogen ist.
2. die Kantenbreite dx_{1m} : es handelt sich hierbei um den Bereich des Schwärzungsverlaufs einer Testzeichenkurve, der zwischen Schwärzungsmini-

mum und -maximum und im Gesichtsfeld des Sehwin-
kels φ liegt.

3. der Sehwinkel φ , d.h. der Winkel, unter dem
sich dem Auge der Versuchsperson die Übergangs-
zone von hell nach dunkel darbietet.

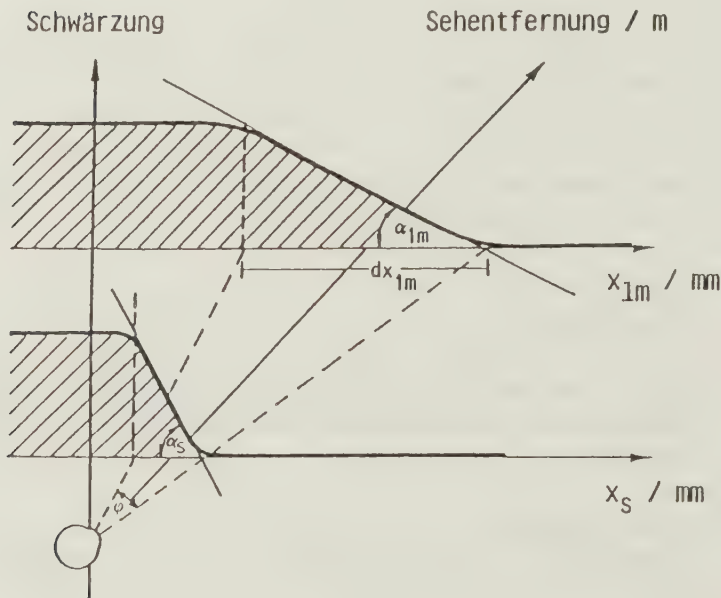


Abb. 4 Darstellung der Metrik

Voraussetzung: Bezugspunkt ist der Sehwinkel φ

α_{1m} : Schwärzungsgradient in 1 m Sehentfernung

α_s : Schwärzungsgradient in der dargebotenen
Sehentfernung

x_{1m} : Ortskoordinate des Referenzobjektes in
1 m Sehentfernung

x_s : Ortskoordinate des Originals in der dar-
gebotenen Sehentfernung

dx_{1m} : Kantenbreite in 1 m Sehentfernung

φ : Sehwinkel der Kantenbreite

Diese 3 aufgeführten Meßgrößen stehen untereinander im Prinzip in Beziehung über folgende Gleichung:

$$\operatorname{tg} \alpha = dS/dx$$

$$\text{bzw.} \quad dx = dS/\operatorname{tg} \alpha \quad / \text{ mm}$$

$$\text{Daraus folgt für } \alpha: \quad \alpha = \arctan dS/dx \quad / \text{ Grad}$$

Für den Schinkel φ gilt hierbei bei einer Referenzobjektentfernung von 1 m:

$$\operatorname{tg} \varphi = dS/10^3 \operatorname{tg} \alpha$$

$$\text{bzw.} \quad = dx/10^3$$

$$\text{und damit für } \varphi: \quad \varphi = \arctan dx/10^3 \quad / \text{ Grad}$$

Die Verwendung der Schwärzung S als logarithmisches Maß steht hierbei im Gegensatz zu der üblich benutzten, linearen Einheit der Helligkeit bzw. Leuchtdichte (cd/m^2).

2.2. Experimente

2.2.1. allgemeine Erläuterungen

Der Proband wurde vor und während jedes Versuchsdurchganges aufgefordert, sich so gut wie möglich auf die Kante des dargebotenen Sehzeichens, d.h. auf die Schwarz-Weiß-Übergangszone des Testzeichens, zu konzentrieren (Einfluß der kognitiven Forderung auf den Akkommodationsvorgang, KRUGER 1980).

Zu Beginn einer Versuchsserie wurde dem Probanden eine Adaptationszeit von 3-5 Minuten gewährt, um seinen Akkommodationszustand an die bestehenden Raumverhältnisse an-

zupassen. Dadurch sollten Akkommodationsschwankungen in Abhängigkeit von der Leuchtdichtevertellung des Raumes vermieden werden. Da die Akkommodationseinstellung keine kontinuierliche Meßwertaufnahme zeigt, sondern am Eingang vermutlich ein "sample-and-hold"-Mechanismus vorliegt, war die Versuchsperson angehalten, bei der Ermittlung der Akkommodationswerte sowohl innerhalb eines Versuchszyklus derselben Unschärfestufe als auch zwischen den Versuchszyklen verschiedener Unschärfe, d.h. intra- und interzyklisch, das zweite Sehobjekt (Malteserkreuz) scharf zu fixieren. Damit wurde das Auge annähernd in die Akkommodationsruhelage zurückgeführt und der Akkommodationsapparat vorübergehend entspannt. Dies diente dazu, eine Fixation der Akkommodation auf einen bestimmten, eingestellten Wert zu verhindern bzw. einem sog. "Akkommodationskrampf" vorzubeugen.

Während das Testzeichen der Versuchsperson während eines Versuchszyklus permanent dargeboten wurde, war die Lasergranulation jeweils nur 500 msec sichtbar. Diese kurze Zeitdauer war jedoch als Darbietungszeit ausreichend, da die kritische Darbietungszeit, d.h. die Zeitverzögerung zwischen Erregungszeitpunkt der retinalen Sensoren und dem "Seitenhemm-Mechanismus" (und damit der Wahrnehmung), im Bereich von 100-200 msec liegt (YAMADE u. HUKAMI, 1980). Außerdem wurde in einem Randexperiment festgestellt, daß eine permanente Granulationsdarbietung im Sinne einer Einstellmethode (d.h. Suche des Muster-Stillstandes bei dauerndem Sichtkontakt der Granulation) keine genaueren Werte liefert als die verwendete Kurzzeitdarbietung. Um einer zu großen Ermüdung des Akkommodationsapparates vorzubeugen, wurde nur eine Versuchsserie pro Tag durchgeführt. Außerdem wurden die Experimente möglichst zur gleichen Tageszeit absolviert, um konstante Versuchsbedingungen einzuhalten.

2.2.2. Versuchsdurchführung

Die Entfernung "Auge-Trommel T" wurde zu Beginn eines Meßdurchganges jeweils so eingestellt, daß ein eindeutiger Zustand der Über- bzw. Unterakkommodation vorhanden war und die Versuchsperson das Granulationsmuster als eindeutig "fließend" empfand. Nach einleitender Fernakkommodation auf das Malteserkreuz wurde das Testzeichen fixiert und bei subjektiv optimaler Akkommodation gleichzeitig das Granulationsmuster dargeboten (500 msec, s.o.).

Im Anschluß daran wurde der fahrbare Schlitten so lange schrittweise um 0.1-0.2 dpt verschoben und die neue Einstellung der Versuchsperson dargeboten, bis die Granulation für den Betrachter stillstand.

Dabei wurde jeder dpt-Wert nur einmal pro Meßdurchgang gezeigt, um eine Fixierung des Akkommodationsapparates auf die Granulation anstelle des Testzeichens zu verhindern.

Der so erreichte Akkommodationswert stellte den Punkt maximaler Akkommodation dar und wurde als solcher notiert. Anschließend folgte der nächste Meßdurchgang, vom entgegengesetzten Fehlakkommodationszustand ausgehend.

Eine Versuchsserie bestand aus 10 Versuchszyklen: Ruhelage zu Beginn und am Ende eines Zyklus, 8 Unschärfestufen (S_{0-4} , S_6 , S_8 , S_{10}). Jede Versuchsserie wurde für dasselbe Symbol dreimal durchgeführt. Jeder Zyklus setzte sich aus 10 Meßdurchgängen zusammen, von denen in abwechselnder Reihenfolge jeweils die Hälfte vom Punkt deutlicher Über- bzw. Unterakkommodation ausging.

2.2.3. Messung der Ruheakkommodation

Bei absoluter Dunkelheit (Halogenlampe L ausgeschaltet, s. Abb. 1) wurde nach obengenanntem Verfahren jeweils zu Beginn und am Ende eines Meßzyklus die Akkommodationsruhelage bestimmt.

2.2.4. Experiment-Varianten

Für das Testzeichen "schwarzer Ring auf weißem Grund" (= negativer Kontrast) wurden Versuchsserien monokular in 5 verschiedenen Entfernungen (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 (= unendlich) dpt) sowie binokular (bei 4.0 dpt) durchgeführt, für alle übrigen Testzeichen in einer 4.0 dpt entsprechenden Entfernung. Die Situation "unendlich" wurde hierbei durch Einsetzen einer Linse (Achromat mit 200 mm Brennweite) im Abstand von 20 cm hergestellt.

Die Unschärfestufen wurden in der Reihenfolge "2-10-6-3-0-8-4-1" dargeboten. Die Stufe "2" wurde als Einstieg gewählt, um dem Auge einen Akkommodationsreiz zwischen "ganz scharf" bzw. "ganz unscharf" anzubieten. Von einer linearen Abfolge der Stufen wurde abgesehen, da sich das Auge sonst an eine positiv bzw. negativ laufende Akkommodationsreihe gewöhnen könnte.

An 5 Personen wurden Kontrollexperimente mit dem Zeichen "schwarzer Ring auf weißem Grund" bei 3.0 dpt durchgeführt.

2.3. Versuchspersonen

Die Experimente wurden an 6 Personen im Alter von 20-26 Jahren durchgeführt. Sämtliche Probanden waren emmetrop oder durch Kontaktlinsen auf Emmetropie korrigiert und besaßen Erfahrung in optometrischen Versuchen.

2.4. Auswertungsmethoden

Für jede Unschärfestufe eines Zeichens wurden 3 Serien à 10 Meßdurchgänge, d.h. insgesamt 30 Meßdurchgänge, durchgeführt. Aus diesen 30 Meßwerten wurden Mittelwert und Standardabweichung im üblichen Verfahren berechnet und die dpt-Werte auf die Ordinate aufgetragen.

3. Ergebnisse

3.1. Verlauf der Originalschwärzungskurven

Abb. 5a-c zeigt den mit einem Mikrophotometer (ZEISS, Jena) aufgezeichneten Verlauf der Schwärzungskurven der Ring-Testzeichen mit positivem und negativem Kontrast sowie des Halbfeldes. Die Kurven geben den Originalverlauf bei verschiedenen Unschärfestufen (0,3,6,9) in einem Verkleinerungsmaßstab von 1:4 wieder. Die vorhandene Schwärzung S (Ordinate) wird gegen die Kantenbreite dx_{1m} in einer Sehentfernung von 1 m (Abszisse) aufgetragen (zum näheren Verständnis siehe auch Abb. 4). Zum Verständnis der Kurven sei die in Abb. 3 dargestellte charakteristische Schwärzungskurve gedacht, die die Abhängigkeit der Schwärzung S von der Belichtung E zeigt (Näheres s.a. in MÜTZE, 1972).

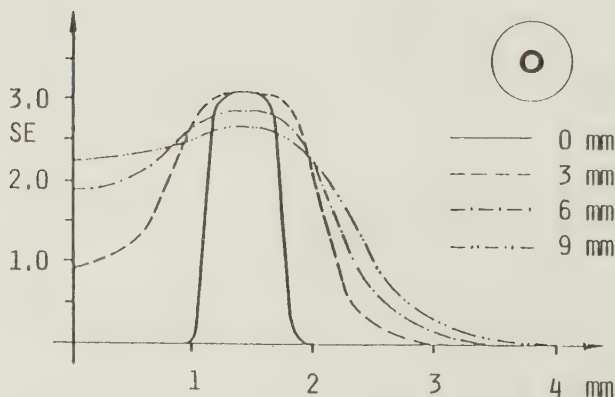


Abb. 5a Erläuterungen siehe nächste Seite

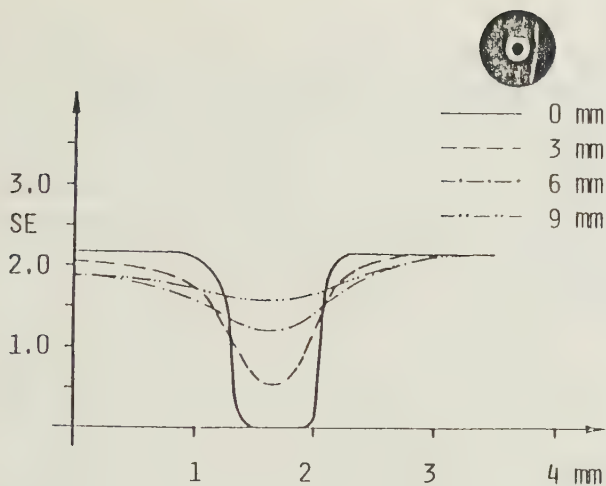


Abb. 5b

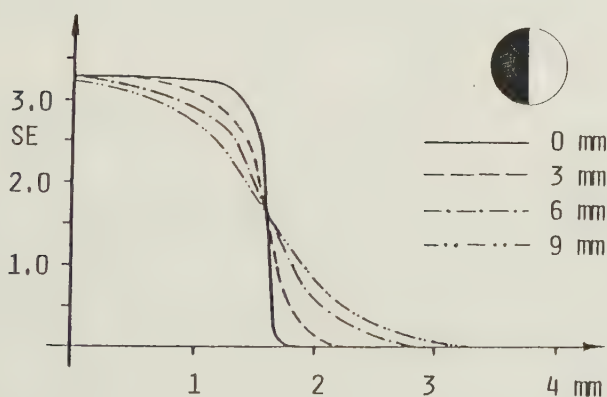


Abb. 5c

Abb. 5a-c

Verlauf der Originalschwärzungskurven

Abszisse: Kantenbreite dx_{1m} / mm ;

Ordinate: Schwärzung S / Schwärzungseinheiten SE

Parameter: Abstand der verunschärfenden
Mattscheibe (0,3,6,9 mm)

Bei jeweils scharfem Testzeichen, d.h. bei Unschärfestufe "0", trat der größte Schwärzungsgradient vom Punkte minimaler bis maximaler Schwärzung auf, die differentielle Empfindlichkeit ds (i.e. die Steilheit der Schwärzungskurve im linearen Bereich) war maximal groß. Damit lag ein Bild guten Kontrastes mit sehr geringer Kantenbreite (<0.5 mm) und einem minimalen Unschärfebereich zwischen dunkel und hell vor.

Zunehmende Verunschärfung der Testzeichen (Stufe 3,6,9) ließ - testzeichenabhängig allerdings sehr verschieden - einerseits Schwärzungsgradient und differentielle Empfindlichkeit signifikant abnehmen, während andererseits die Kantenbreite erwartungsgemäß entsprechend zunahm und sich damit analog zur Unschärfe verhielt. Weiterhin ergaben sich bei verstärkter Unschärfe Formveränderungen bei den radialsymmetrischen Testzeichen und "Strich"-Breitenänderungen bei den Balken.

Optisch imponierte allgemein die Abrundung des Kurvenverlaufs der Schwärzungskurven sowie - besonders ausgeprägt bei den achsen- und radialsymmetrischen Testzeichen mit positivem Kontrast - die Abnahme der Schwärzungsamplitude um bis zu 78%. Bei einigen Testzeichen wurde also unschärfeabhängig der Punkt maximaler Schwärzung bzw. Schwärzungsfreiheit gar nicht mehr erreicht im Gegensatz zu dem achsensymmetrischen Strichzeichen negativen Kontrastes (ohne Abbildung) und dem Halbfeld, die - wenn auch aufgrund der vergrößerten Kantenbreite als Ausdruck der Schwärzungsbreite verzögert - eine nahezu vollständige bzw. volle Schwärzungsamplitude einstellten. Die mit Amplitudenreduzierung verbundene Kontrastabnahme führte unter Beseitigung von MACH-Kontrastphänomenen, die bei größerer Schärfe vorhanden sind, visuell zu einem Übergang mehr in einen "grau-weißen" als "schwarz-weißen" Grenzbereich.

Die Amplitudenabnahme an sich erfolgte bei der Mehrzahl

der Testzeichen dabei nicht kontinuierlich, sondern in unterschiedlichen Sprüngen mit der Tendenz, bei großer Unschärfe mit einem geringeren Amplitudenverlust zu reagieren.

Besonders bei Betrachtung des Amplitudenverhaltens, aber auch an der interindividuell unterschiedlichen Zunahme der Kantenbreite zeigte sich ferner, daß der Einfluß der durch die Mattscheibe bedingten Unschärfe für Zeichen positiven und negativen Kontrastes verschieden ist.

3.2. Schwärzungsverhalten bei zunehmender Verunschärfung

Abb. 6 zeigt das Amplitudenverhalten, i.e. der photometrische Kontrast $L_1/L_2 = K$ (hier: $\lg K$), aller verwendeten Testzeichen bei zunehmender Unschärfe in einer Bezugsentfernung von 1 m. Die Schwärzungsdifferenz dS , der logarithmische, dimensionslose Kontrast, ist auf der Ordinate aufgetragen.

Die Abbildung verdeutlicht, daß die meisten Schärfemaxima der Testzeichen (80%) im Schwärzungsbereich 3.0 ± 0.25 SE lagen. Einzige Ausnahme bildete das radialsymmetrische Zeichen mit positivem Kontrast (Maximum 2.25 SE); dieses Zeichen hatte aber, wie in Abb. 5b ersichtlich, auch im photometrierten Schwärzungskurvenverlauf nur ein Schwärzungsmaximum von 2.25 SE, so daß die Abweichung von den übrigen Testzeichen im Aufbau des Testzeichens an sich liegen dürfte.

Testzeichen negativen Kontrastes sowie das Halbfeld behielten ihre Schwärzungsamplitude weitgehend bei und unterlagen nur einer sehr geringen, diskontinuierlichen Abnahme bzw. Schwankung der Schwärzung: Bei einer maximalen Abnahme von ca. 0.75 SE (entsprechend 25% des Maximalwer-

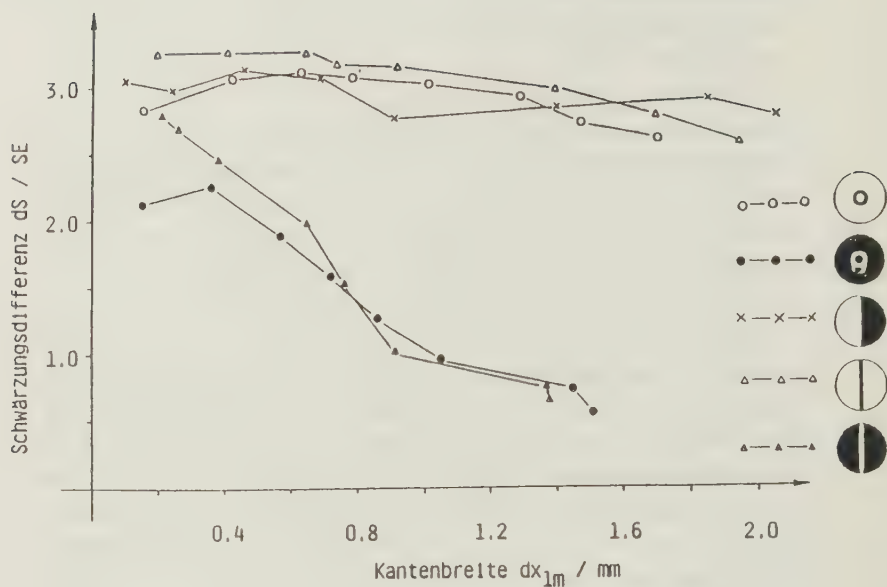


Abb. 6 Schwärzungsverhalten verschiedener Testzeichen bei zunehmender Verunschärfung

tes) lag das Schwärzungsminimum immer über 2.5 SE. Somit weist auch ein unscharfes Testzeichen noch einen guten Kontrast auf.

Im Gegensatz zu dieser Schwärzungskonstanz zeigten die inversen Testzeichen (positiver Kontrast) einen großen Verlust ihrer Eingangsschwärzung. Die zunehmende Unschärfe schien offensichtlich einen wesentlich größeren Einfluß auf den Schwärzungsverlauf bzw. Kontrastverlust dieser Testzeichen zu nehmen. Es kam zu einer Abnahme der Schwärzungsamplitude um das Doppelte (1.5 SE bei positivem Ring) bzw. Dreifache (2.25 SE bei positivem Balken) bis hin zu einem minimalen Schwärzungswert von ca. 0.5 SE.

Beide Testzeichen lagen dabei bei größter Unschärfe dicht beieinander ($dS=0.10$ SE).

Mit diesem Schwärzungsverlust ging gleichzeitig die Ausbildung einer breiteren grauen Übergangszone einher, verbunden mit der Abnahme des (photographischen) Kontrastes; somit mußte auch eine Einbuße der Differenzierungsmöglichkeit zwischen verschieden scharfen Punkten hingenommen werden.

Die Kantenbreite dx war bei Testzeichen negativen Kontrastes (dunkle Zeichen auf hellem Grund) größer und führte auf diese Weise zu einer verstärkten Abnahme des Schwärzungsgradienten. Damit wurden die Auswirkungen des unterschiedlichen Reaktionsverhaltens der Testzeichen bezüglich des Schwärzungsverhaltens gemindert und die Kontrastdifferenzierung der einzelnen Testzeichen einander angenähert.

3.3. Einfluß der Sehentfernung

Das Verhalten der Akkommodation bei der Darbietung des negativen, radialsymmetrischen Testzeichens bei 5 verschiedenen Entfernungen (4.0, 3.0, 2.0, 1.0 sowie 0.0 dpt) ist in Abb. 7 dokumentiert. Auf der Ordinate sind die vom Auge eingestellten Akkommodationswerte (dpt) aufgetragen, auf der Abszisse die Kantenbreite des Unschärfebereiches der Testzeichen (mm), wie sie das Auge in der jeweiligen Sehentfernung sieht (siehe dazu Abb. 4). Es handelt sich hierbei um anschauliche, dem Leser verständliche Maßeinheiten; damit wird nicht die Garantie geliefert, daß der Bereich des Testzeichens erfaßt ist, der als maßgeblicher Akkommodationsstimulus wirkt - z.B. die Steilheit der Schwärzungskurve im linearen Bereich oder jeweils die Krümmungsbereiche der Kurve.

Die Entfernung des Testzeichens vom Auge und die Kantenbreite stehen erwartungsgemäß in einem umgekehrt propor-

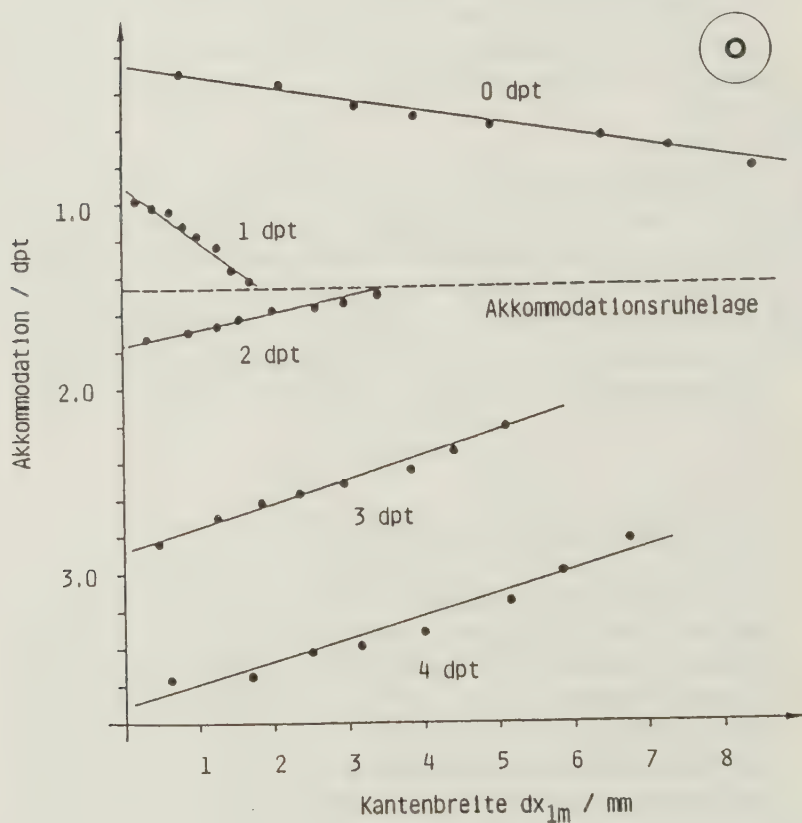


Abb. 7

Einfluß der Kantenbreite dx_{1m} (Sehzeichenschärfe) auf die Akkommodationseinstellung für verschiedene Sehentfernungen (0,1,2,3,4 dpt);
Regressionsgeraden: —————

tionalen Verhältnis zueinander: Eine Vergrößerung der Distanz "Auge-Zeichen" (i.e. Abnahme der dpt) führte zu einer Verringerung von dx. Der Graph "0.0 dpt", der der Einstellung "unendlich" entsprach, wies die größte Kanntenbreite (ca. 7.75 mm) auf. Dies war durch die Art der Darbietung zu verstehen (siehe Methodik).

Die Akkommodationsruhelage lag vor und nach den Testzeichenmessungen durchschnittlich bei 1.46 dpt und unterlag nur geringen Schwankungen (± 0.10 dpt entsprechend 7%). Sie befand sich damit in dem von SCHÖBER angegebenen durchschnittlichen Bereich der menschlichen Ruhelage (0.5-2.0 dpt).

Der erwartete Sollwert wurde schon bei vollkommen scharfem Testzeichen unterschiedlich ausgeprägt nur in einem unvollständigen Maße erreicht. Je geringer die Distanz zwischen Testzeichen und Versuchsperson und je größer damit die verlangte Akkommodationsanstrengung war, desto stärker trat eine Abweichung vom dargebotenen Sollwert, i.e. ein Akkommodationsdefizit, in Erscheinung. Dieses Akkommodationsdefizit betrug z.B. bei der Maximalanforderung 4.0 dpt (d.h. eine dem Durchschnittsalter der Versuchspersonen nicht unangemessen schwere Akkommodationsanforderung) 0.40 dpt (entsprechend 10% des Sollwertes), bei 3.0 dpt noch 0.15 dpt (entsprechend 5%). Bei 1.0 dpt Sollwert kam es zwar zu einer, allerdings minimalen Überakkommodation von 0.02 dpt (entsprechend 2%), was jedoch einer Einstellung des Sollwertes nahezu gleichkam und daher vernachlässigt werden konnte.

Eine Annäherung der Akkommodationsanforderung an die Akkommodationsruhelage und damit eine Entlastung des Akkommodationsapparates reduzierte die Sollwertabweichung demnach beträchtlich (Tab. 1).

Akk.anforderung	4.0	3.0	2.0	Akk. Ruhelage (1.46)	1.0	0.0
max. Akk.leistung	3.60	2.85	1.75		0.98	0.30
Sollwertabweichung (0 mm)	0.40	0.15	0.25		+0.02	0.30
Sollwertabweichung (10 mm)	1.20	0.75	0.50		0.45	0.85
Akk.drift	0.80	0.60	0.25		0.47	0.55

Tab. 1 Akkommodationsanforderung, größter erzielter Akkommodationswert, Sollwertabweichung bei 0 und 10 mm Unschärfe, Akkommodationsdrift (dpt)

Es gelang dem Betrachter also, mit einer geringeren Akkommodationsanstrengung als erwartet das dargebotene Testzeichen optimal scharf zu sehen. Ursache hierfür könnte eine Akkommodationsfaulheit der Versuchsperson sein (siehe HEATH, 1956b: "lazy lag of accommodation"), ebenso aber auch der Einfluß unbekannter kombinierender Strukturen im Umsetzungsbereich von optischem Signal zur sinnesphysiologischen Wahrnehmung.

Mit beginnender und zunehmender Unschärfe driftete die Akkommodationsantwort kontinuierlich und annähernd linear immer mehr von dem (bei Stufe 0) eingestellten Akkommodationswert in die Richtung der Akkommodationsruhelage. Die Ruhelage selbst wurde von den Graphen der sie unmittelbar umgebenden Testzeichen (1.0 und 2.0 dpt) nahezu erreicht, zu einer Überschreitung derselben kam es jedoch nicht.

Verbunden mit dieser Akkommodationsdrift war gleichzeitig eine Vergrößerung der Sollwertabweichung (= Akkommodationsdefizit). Das Ausmaß der Akkommodationsdrift zwil-

schen Unschärfestufe 0 und 10 und damit der Zunahme des Akkommodationsdefizits nahm parallel zu einer Reduzierung der Akkommodationsanforderung signifikant um bis zu 67% ab. Offensichtlich scheint die Drift in Abhängigkeit zur Entfernung von Testzeichen und Auge zu stehen (Tab. 1).

Bereits eine minimale Defokussierung der Testzeichen führte zu einem sichtbaren "Absinken" bzw. Annähern der Akkommodation hin zur Ruhelage, verbunden mit einer deutlichen Unterakkommodation mit dem zusätzlichen Effekt einer weiteren, akkommodativ bedingten Unschärfe.

Dies gilt sowohl für den Bereich der Nah- als auch Fernakkommodation und spricht dafür, daß die Akkommodationsruhelage ein vom Fernpunkt verschiedener Zustand des Akkommodationsapparates ist und damit für die Fernakkommodation ebenfalls eine Akkommodationsanstrengung nötig ist.

3.4. Einfluß der Testzeichengestalt

Vorgegebener einheitlicher Akkommodationssollwert für alle 5 Testzeichen war die stärkste eingesetzte Akkommodationsanforderung von 4.0 dpt. Die erzielten Akkommodationswerte lagen zwischen maximal 3.75 dpt bei größter Schärfe und minimal 2.75 dpt bei völliger Unschärfe, d.h. die Akkommodationsdifferenz betrug ca. 1.0 dpt (Abb. 8).

Unabhängig von der Testzeichengestalt kam es auch hier bei der schärfsten Abbildung aller Testzeichen bereits zu einer verschieden stark ausgeprägten Sollwertabweichung; dabei riefen die Zeichen positiven Kontrastes eine präzisere Scharfeinstellung hervor als ihre entsprechenden inversen Elemente (Tab. 2). Strichzeichen wiesen eine etwas stärkere Sollwertabweichung auf als radialsymmetrische Testzeichen. Der durchschnittlich erreichte Akkommoda-

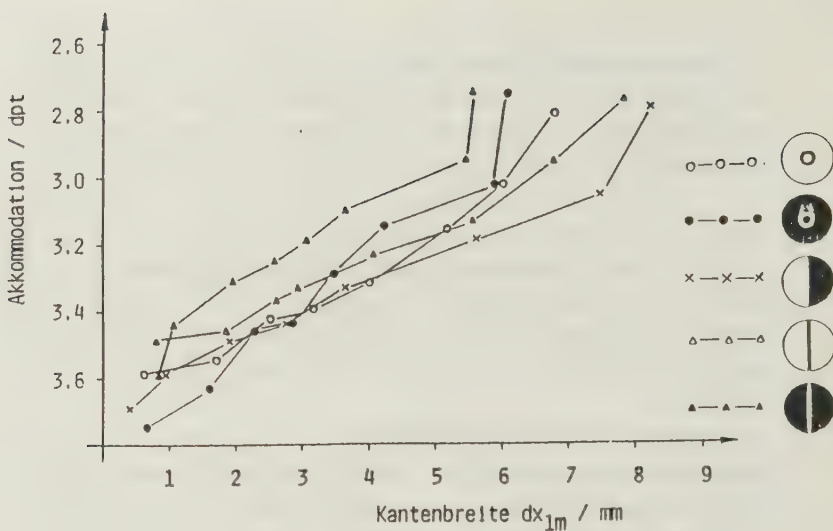


Abb. 8 verschiedene Testzeichen bei gleichem Akkommodationsollwert (4.0 dpt) für verschiedene Kantenbreiten dx_{1m} (Schärfen)

Testzeichen					
Akk.leistung (0 mm)	3.60	3.75	3.60	3.50	3.70
Akk.leistung (10 mm)	2.80	2.75	2.75	2.80	2.80
Sollwertabweichung	0.40	0.25	0.40	0.50	0.30
Akk.drift	0.80	1.00	0.85	0.70	0.90

Tab. 2 Akkommodationsleistung bei minimaler (0 mm) und maximaler (10 mm) Unschärfe, Sollwertabweichung und Akkommodationsdrift von 5 Testzeichen bei 4.0 dpt Sollwert (dpt)

tionswert bei scharfem Bild betrug 3.63 dpt und lag ca. 10% unter dem geforderten Sollwert.

Ebenfalls unabhängig von der Gestalt der Testzeichen trat allgemein mit zunehmender Verunschärfung ein kontinuierliches Absinken der Akkommodation in die Richtung der Ruhelage auf. Diese schon bereits bekannte Akkommodationsdrift (siehe 3.3) betrug durchschnittlich 0.85 dpt; dies entsprach einer ungefähren Akkommodationsantwort-Abnahme von 20% der erfordernten bzw. 23% der aufgebrachten Akkommodationsleistung. Dabei wurde bei den negativen Testzeichen (Verlust 0.70 dpt bzw. 0.80 dpt) eine größere Akkommodationsdisziplin als bei den positiven Testzeichen (0.85 dpt bzw. 1.00 dpt) gewahrt; dasselbe gilt für die radialsymmetrischen Testzeichen gegenüber den achsensymmetrischen. Das Halbfeld lag mit einer Drift von 0.90 dpt im Bereich der positiven Testzeichen (Tab. 2).

Alle Testzeichen provozierten bei maximaler Unschärfe trotz verschiedener Kantenbreite eine ähnlich große Akkommodationssollwertabweichung (1.22 ± 0.03 dpt). Somit scheint die Akkommodationsantwort in größeren Unschärfebereichen weitgehend unabhängig von der Testzeichengestalt, jedoch abhängig vom Grad der Verunschärfung zu sein.

Der größte Akkommodationssprung und somit stärkste Akkommodationsverlust (ca. 26%) trat jeweils beim Übergang von Stufe 8 zu Stufe 10 auf, also zwischen den zwei unschärfsten Testzeichendarbietungen. Die Testzeichen positiven Kontrastes zeigten hierbei im Gegensatz zu den übrigen Testzeichen nur eine geringe Zunahme der Kantenbreite von 0.1 mm (Balken) bzw. 0.2 mm (Ring).

Die Kantenbreite nahm mit zunehmender Unschärfe in inter- und intraindividuell unterschiedlich großen Sprüngen uncharakteristisch zu. Testzeichen positiven Kontrastes

zeigten hier im Vergleich zu ihren inversen Elementen die geringere Gesamt-Kantenbreite bei größerem Akkommodationsverlust. Für den Betrachter standen sie in ihrer Attraktivität als Akkommodationsstimulus offensichtlich hinter der der negativen Testzeichen zurück. Dieser Effekt wurde noch durch das wesentlich größere Schwärzungsdefizit (siehe 3.2.) verstärkt.

Das Halbfeld zeigte einen den positiven Testzeichen ähnlichen Umfang der Akkommodationsdrift (Tab. 2), verfügte jedoch über die größte Kantenbreite und damit breiteste Unschärfezone aller verwendeten Testzeichen.

Vergleicht man die Werte der Kantenbreite aller Testzeichen bei der gleichen, einheitlichen Unschärfestufe, so fällt bei der schärfsten Testzeichen-Stufe eine relativ geringe Streuung (ca. 0.45 mm) ins Gewicht, während bei maximaler Unschärfe eine ca. 6-fach erhöhte Streuung (ca. 2.5 mm) imponiert. Mit zunehmender Verunschärfung nimmt also der Einfluß der Unschärfe auf die Gestalt der Testzeichen vermehrt zu.

3.5. Überprüfung der Ergebnisse an Kontrollpersonen bei 3.0 dpt

Eine Überprüfung der Ergebnisse an 5 Kontrollpersonen, für die zur Erleichterung die Akkommodationsanforderung von 4.0 auf 3.0 dpt reduziert wurde, zeigte in ihren wesentlichen Ergebnissen eine deutliche Übereinstimmung: Bei zunehmender Unschärfe trat auch bei diesen Personen ein Akkommodationsverhalten mit Sollwertabweichung und Akkommodationsdrift in den Vordergrund (Abb. 9).

Dabei ergaben sich jedoch sowohl inter- als auch intra-individuell relativ große Schwankungen dieser Parameter (Tab. 3).

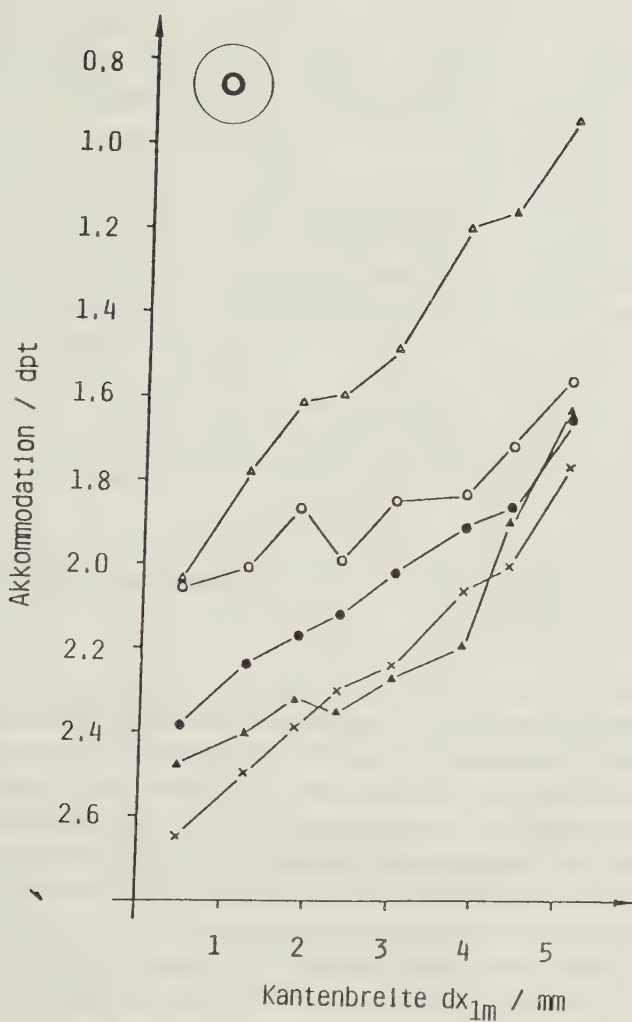


Abb. 9 Akkommodationsverhalten von 5 Kontrollpersonen bei 3.0 dpt Akkommodationssollwert für verschiedene Kantenbreiten dx_{1m} (Sehzeichenschärfen) (siehe auch Tab. 3)

Versuchsperson	Alter / Sehverhalten	Ruהלage	Akk. / Sollw. abw.	Akk. drift
GM ♀ •	23 / emmetrop orthophor	1.35	2.40 / 0.60	0.65
BS ♂ ◯	23 / emmetrop orthophor	0.45	2.05 / 0.95	0.50
CS ♀ ▲	26 / emmetrop exophor	1.35	2.50 / 0.50	0.80
CSH ♀ ×	25 / emmetrop orthophor	1.50	2.65 / 0.35	0.90
PH ♂ Δ	26 / hyperop orthophor	0.75	2.05 / 0.95	1.10

Tab. 3 Werte der Kontrollpersonen; Sollwert 3.0 dpt (dpt)

Deutlicher als bei der sehr gut trainierten Versuchsperson trat ein eventuell durch Akkommodationsfaulheit bedingtes Akkommodationsunvermögen in Erscheinung. Schon beim schärfsten Testzeichen betrug die Sollwertabweichung 0.30 bis 0.40 dpt und wies damit einen bis zu 5 1/2 fach erhöhten Wert auf (siehe Tab. 1 und 3). Interindividuell lag die Sollwertschwankung bei völliger Schärfe bei ca. 0.60 dpt und bei größter Unschärfe in einem Bereich von 0.20 dpt. Es kommt also auch bei völliger Verunschärfung nicht zur Einstellung eines einheitlichen Akkommodationswertes, was aber angesichts der Ruhelageschwankung durchaus verständlich ist.

2 von 5 Kontrollpersonen (GH, BS) zeigten eine relativ geringe, den Hauptversuchen entsprechende Akkommodationsdrift, der Rest wies z.T. wesentlich höhere Werte auf.

Isoliert muß die Versuchsperson PH betrachtet werden. Sie wies schon bei scharfer Abbildung der Testzeichen eine sehr große Sollwertabweichung ($0.95 \text{ dpt} = 32\%$ des Sollwertes) sowie die stärkste Akkommodationsdrift (ca. 1.10 dpt) auf. Eine nachträglich in Zykloplegie durchgeführte objektive Untersuchung ließ eine leichte Hyperopie erkennen. (KURTEV und LAYTON wiesen 1979 nach, daß die Unschärfeschwelle myoper Testpersonen derjenigen von Emmetropen ähnlich ist. Für den Bereich der Hyperopie scheint dies jedoch fraglich).

3.6. Vergleich von monokularer und binokularer Darbietung

Das radialsymmetrische Testzeichen mit negativem Kontrast wurde bei einer Sehentfernung von 4.0 dpt monokular und binokular dargeboten (Abb. 10).

Das bereits bekannte Akkommodationsverhalten konnte auch bei binokularer Darbietungsform nachgewiesen werden: Binokulares Sehen führte weder zum vollständigen Erreichen noch zu einer genaueren Einstellung des Akkommodations-sollwertes; das Akkommodationsdefizit bei Stufe 0 war mit dem der monokularen Darbietung nahezu identisch (Abweichung monokular 0.41 dpt gegenüber binokular 0.43 dpt).

Auf zunehmende Unschärfe reagierte der binokulare Akkommodationsapparat ebenfalls mit einer Akkommodationsdrift in Richtung der Ruhelage. Interindividuell unterlag jedoch das binokulare Sehen einer um etwa 20% geringeren Akkommodationsdrift (binokular 0.61 dpt vs. monokular 0.77 dpt) und wies eine um 23% niedrigere Akkommodations-schwankung bei den einzelnen Unschärfestufen auf (Standardabweichung binokular 0.11 dpt vs. monokular 0.14 dpt).

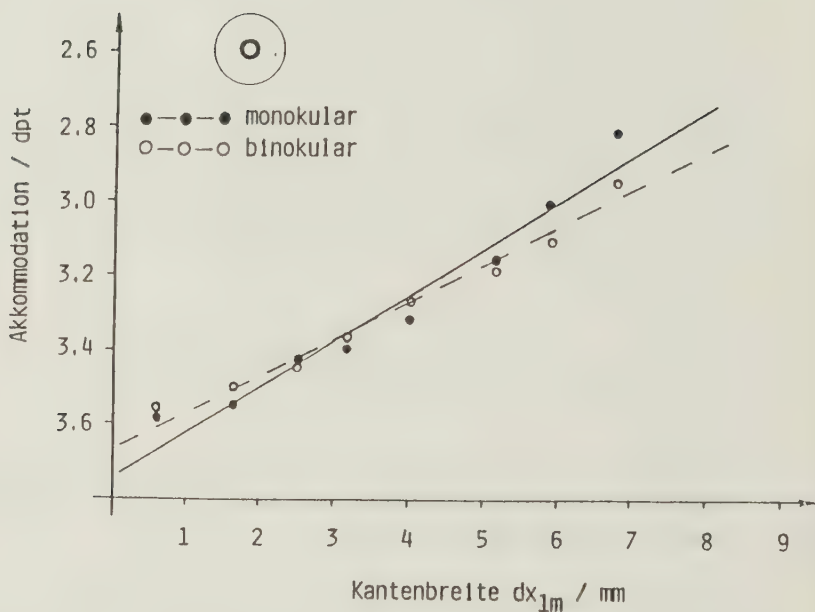


Abb. 10 Vergleich der mon- und binokularen Darbietung bei konstantem Sollwert (4.0 dpt) und gleichem Testzeichen für verschiedene Kantenbreiten (Schärfen);
Regressionsgeraden: ———, - - - -

4. Diskussion

Die Betrachtung des Akkommodationsvorganges am menschlichen Auge ist eng mit der Frage nach dem akkommodationsauslösenden Stimulus verbunden. Neben anderen Reizen, wie z.B. Objektgröße, chromatische und sphärische Aberration, ist die Schärfe bzw. Unschärfe, mit der betrachtete Strukturen dem Auge dargeboten werden, ein wichtiger, wenn nicht vielleicht sogar der dominierende Stimulus.

Hierbei gilt es jedoch, zwischen zwei Arten von Unschärfe zu differenzieren, nämlich:

1. der Defokussierungsunschärfe , d.h. einer internen und aktiven (durch den eigenen Organismus hervorgerufenen) Verunschärfung auf der menschlichen Retina. Sie entsteht durch eine Änderung der Lichtkonvergenz des auf die Retina auftreffenden Strahlenbündels, indem das fixierte Objekt aus dem Brennpunkt entfernt wird.
2. der Zeichenunschärfe , i.e. einer externen und passiven Verunschärfung des im Brennpunkt verbleibenden Testzeichens ohne Veränderung der retinalen Lichtkonvergenz. Diese z.B. durch Vorsetzen einer streuenden Mattscheibe erzeugte Unschärfe kann - im Gegensatz zur aktiven Defokussierungsunschärfe - vom Akkommodationsapparat nicht kompensiert werden; trotz maximaler Akkommodationsanstrengung und optimal scharfer Fixierung weist das Testzeichen weiterhin nur unscharfe Strukturen auf. Etwas "Unscharfes" wird "scharf" gesehen.

Hypothetisch verfügt der Akkommodationsapparat über verschiedene Möglichkeiten, auf ein scharfes bzw. progredient unscharfes Testzeichen zu reagieren (Abb. 11).

Bei vollkommen scharfem Testzeichen kann ein Akkommodationswert eingestellt werden, der dem dargebotenen Sollwert genau entspricht. Demgegenüber könnte auch eine

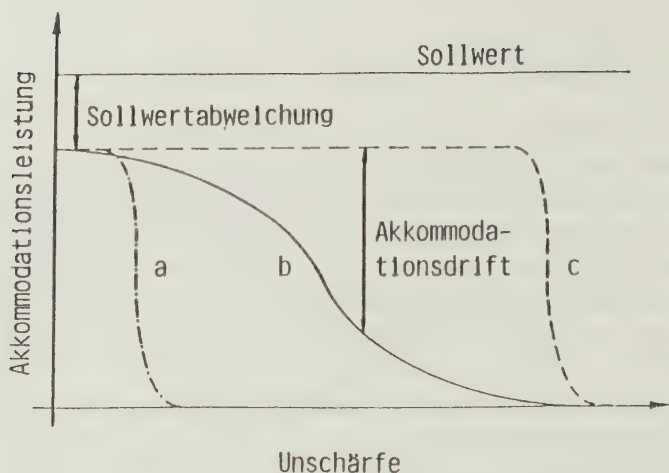


Abb. 11 hypothetisch mögliche Reaktionsformen des Akkommodationsapparates auf zunehmende Verunschärfung: Unter Berücksichtigung der beiden Phänomene "Sollwertabweichung" und "Akkommodationsdrift" scheint die graduierte Form "b" gültig zu sein.

- a: sofortiger Zusammenbruch des Akkommodationsvermögens
- b: langsam abnehmendes Akkommodationsvermögen
- c: weitgehender Erhalt des Akkommodationsvermögens

Sollwertabweichung vorliegen: Bei maximaler Testzeichenschärfe würde das Testzeichen aus sehr verschiedenen Gründen (siehe später) scharf und deutlich gesehen werden, ohne daß der erwartete Sollwert vollständig erreicht wird.

Die tägliche Auseinandersetzung mit mehr oder weniger unscharfen Strukturen läßt darauf schließen, daß wir auf eine Unschärfe mit einem bestimmten Akkommodationsverhal-

ten reagieren.

Eine Möglichkeit wäre, daß das Akkommodationssystem eine geringe Verunschärfung ignoriert, aber nur einen niedrigen Unschärfe-Schwellenwert besitzt und relativ rasch zusammenbricht (Abb. 11a).

Andererseits könnte das System eine enorme Unschärfe tolerieren und die Möglichkeit besitzen, eine beträchtliche Verunschärfung zu kompensieren. Erst bei Erreichen eines hohen Unschärfegrades würde die Akkommodationsleistung auf einen Minimalwert abfallen (Abb. 11c).

Diese beiden Verhaltenstypen sprächen dafür, daß die menschliche Akkommodation einem "Alles-oder-Nichts"-Prinzip unterliegt. Auch FINCHAM's Aussage (1951), daß eine Verunschärfung keinen Akkommodationsstimulus liefere, wäre durch ein derartiges Verhalten erklärbar; möglicherweise läge der von ihm gewählte Unschärfebereich innerhalb der Unschärfetoleranz, in der der Akkommodationsapparat noch ausreichend funktionsfähig ist.

Das System könnte schließlich im Sinne einer Gradierung arbeiten (Abb. 11b) und unterläge damit einer kontinuierlichen Akkommodationsdrift: Schon auf beginnende Unschärfe reagiert es mit einer Reduktion der Akkommodationsleistung, bei progredienter Unschärfe nimmt die Akkommodationsantwort immer stärker ab bis hin zu Minimalwerten. Verschiedene Unschärfestufen eines Testzeichens würden somit als verschieden starke Akkommodationsstimuli wirken.

Für dieses Verhalten einer graduierten Akkommodationsantwort spricht u.a. die Tatsache, daß unser Akkommodationssystem imstande ist, äußerst genau zwischen verschiedenen Schärfe- bzw. Unschärfestufen zu differenzieren (HAMERLY und DVORAK, 1981). Auch findet sich eine Bestätigung in

den Ergebnissen verschiedener Autoren (STARK u. TAKAHASHI, 1965; SMITHLINE, 1974; PHILLIPS u. STARK, 1977), die der Unschärfe eine mehr oder weniger bedeutende Rolle als Akkommodationsstimulus zuschreiben.

Tatsächlich lassen sich die zwei Phänomene "Sollwertabweichung" und "Akkommodationsdrift" bei allen Experimenten dieser Arbeit ohne Ausnahme nachweisen.

Beide Erscheinungen treten dabei unabhängig von Testzeit-
chengestalt und -entfernung auf, die Sollwertabweichung
außerdem unabhängig von der Art der Betrachtung (mon-
oder binokular). Ihre Ausprägung hängt jedoch von der
Testzeichenentfernung ab: Je mehr ein Testzeichen in den
Bereich der Ruhelage rückt, desto genauer stellt das
Auge - wahrscheinlich aufgrund einer Entlastung des Ak-
kommodationsapparates - den Sollwert ein und desto gerin-
ger ist die Drift. Eine vernünftige Konsequenz wäre, die-
ses Ergebnis in der Praxis zu überprüfen und Bildschirme
am Arbeitsplatz in einer der Ruhelage entsprechenden Ent-
fernung zum Arbeitspersonal aufzustellen.

Die Scharfeinstellung verfügt auch über gewisse subjektive
Komponenten. So kann es Ausdruck einer Akkommodations-
faulheit sein: Die Wahrnehmung liefert ein "scharfes"
Bild, ohne daß die vom Auge erwartete Leistung erbracht
wird. MORGAN und OLMSTEAD (1939) bezeichneten als erste
dieses Phänomen als "lazy lag of accommodation" (=durch
Faulheit bedingte Abweichung der Akkommodation): in ähn-
licher Weise interpretieren andere Autoren diese Minder-
akkommodation (HEATH, 1956b; FINCHAM u. WALTON, 1958; AL-
FERN u. DAVID, 1958; WARSHAWSKY, 1963; LUDLAM, 1968;
TOATES, 1972). Ob eine passive Akkommodationsfaulheit oder
ein aktives Widerstreben gegen den Vorgang der Akkommoda-
tionseinstellung - von HEATH (1956b) "reluctance" genannt -
vorliegt, läßt sich ohne weitere Untersuchungen nicht sa-
gen.

Eine additive Komponente bei der Sollwertabweichung stellt auch das mögliche Vorliegen eines Erkennungsverlangens dar (KRUGER, 1980). Das Testzeichen ist - auch subjektiv empfunden - maximal scharf, folglich muß es scharf gesehen werden. Dieses Erkennungsverlangen führt evtl. zu einem "effektiveren" Ausnutzen der gelieferten Information, indem neuronale Bahnen im Sinne kombinierender Strukturen (im Umsetzungsbereich vom optischen Signal zur sinnesphysiologischen Wahrnehmung) aktiviert werden. Das subjektive Sehen verstärkt damit über eine Steigerung der Aufmerksamkeitssteuerung auf neuronaler Ebene die Konvergenz retinaler und thalamoretikulärer Impulse an kortikalen Neuronen.

Eine Hilfestellung hierbei könnten gewisse Testzeichenstrukturen (z.B. Eckpunkte, Krümmungslinien) liefern, wenn sie als Erkennungsmerkmale gegenüber dem Kriterium "Schärfe" dominant sind.

Im Gegensatz zu der Aussage von FINCHAM und WALTON (1957), die der monokularen Betrachtungsweise ein größeres "accommodation lag" zuschreiben, weist binokulare Betrachtung in den vorliegenden Versuchen keine geringere und damit verbesserte, initiale Sollwertabweichung auf. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich darin, daß junge und trainierte Personen als Probanden gewählt wurden. Der "Einfluß der Konvergenz und ihrer relativen Führungsrolle beim dynamischen Verhalten der gekoppelten Regelkreise beim binokularen Sehen" (KRUEGER, 1968) sowie der Einfluß anderer an die Binokularität gebundener Parameter scheint auf die Sollwertabweichung - im Gegensatz zu geringerer Akkommodationsdrift und größerer Einstellgenauigkeit der Einzelwerte - in seiner Bedeutung eher vernachlässigbar zu sein.

Schon bei der geringsten Verunschärfung (Unschärfestufe 1; Zunahme der Kantenbreite dx_{1m} um 0.05 mm) wird die Ak-

kommodation in eine nahezu lineare Drift in Richtung der Akkommodationsruhelage versetzt. Letztere wird dabei trotz mehr oder weniger starker (von der Entfernung der Testzeichen abhängig, s.o.) Drift weder vom Bereich der Nah- noch dem der Fernakkommodation aus überschritten.

Das sofortige Einsetzen der Drift zeigt die Empfindlichkeit des menschlichen Abbildungssystems und bestätigt die Aussagen von HAMERLY und DVORAK (s.o.). Der Akkommodationsapparat unterliegt offenbar keinem "Alles-oder-Nichts"-Prinzip, sondern ist im Sinne einer Gradierung zu einer Akzentuierung seines Verhaltens fähig.

Neben einer Akkommodationsfaulheit bzw. einem mentalen Einfluß auch hier als Ursache, dürfte die Reduktion der dynamischen Akkommodationsantwort - im Einklang mit BOUR (1980) - auch durch die beträchtliche Abnahme des Testzeichenkontrastes bedingt sein. Zum weiteren Verständnis kann hier das photometrisch nachgewiesene Schwärzungsverhalten (Abnahme der Schwärzungsamplitude, Zunahme der Kantenbreite etc., siehe 3.2.) dienen. Eine Abnahme des Kontrastes geht meist mit einer Vergrößerung der Kantenbreite des Testzeichens einher. Zunehmende Kantenbreite bedeutet aber eine niedrigere Raumfrequenz und damit eine geringere Akkommodationspräzision (CHARMAN und TUCKER, 1978).

Hier zeigt es sich, daß es in der Metrik sinnvoll ist, anstelle eines Steigungswinkels α die Kantenbreite dx als Bezugsgröße zu wählen. Sie ist außerdem nicht nur amplitudenunabhängig und eine lineare Größe, sondern steht auch mit der Retina als Ort der Defokussierung in Verbindung, entspricht sie doch dem Schinkel ϕ , unter dem das Auge das Testzeichen und die Unschärfezone sieht.

Wie schon angedeutet, scheint das bestehende Kontrastverhältnis nicht unbedeutend zu sein: Positive Testzeichen

zeigen trotz anfänglich geringerer Sollwertabweichung eine stärkere Drift als negative Testzeichen, die zudem auch bei großer Unschärfe eine beträchtliche Schwärzungsamplitude und damit eine bessere Differenzierungsgrundlage beibehalten. Teilweise dürften hier physikalisch-optische Gründe der Irradiation auf der Retina ursächlich sein. So werden die Grenzkonturen positiver Testzeichen durch die Lichtstreuung stärker verändert als die von negativen Testzeichen: Erstere verschwimmen nach außen hin, während letztgenannte durch die Randirradiation des Lichtes verdünnt und verschärft werden. Diese Unschärfetendenz der positiven Testzeichen kann auch durch die physiologischen Kompensationsmechanismen der antagonistischen B- und D-Neuronensysteme (siehe später) nicht optimal ausgeglichen werden.

Wie im Bereich der Bildschirmtechnik bereits bekannt, würde ein heller Bildschirm mit dunkler Schrift (was einem negativen Kontrastverhältnis entspricht) besser verträglich sein sowie über eine bessere Erkennungspräzision verfügen. Es dürfte u.a. in höheren Produktionskosten begründet liegen, daß trotz technischer Möglichkeit nicht diese Art der Informationsdarbietung gewählt wird.

Auch bei konstanter Fixierung eines Testzeichens treten permanente Mikrofluktuationen bzw. Oszillationen des Akkommodationsapparates mit einer Amplitude von ca 0.25 dpt und einer Frequenz von 1-2 c/s auf und beeinflussen die Einstellung des Akkommodationswertes (ALPERN, 1958; CAMPBELL, 1959; CAMPBELL et al., 1959; WESTHEIMER, 1966; KRUEGER, 1978). Diese Mikrofluktuationen gehen jedoch nicht über den maximalen Akkommodationswert hinaus und liefern für die Justierung nur eine Relativ-, jedoch keine Absolutinformation. Eine zunehmende Unschärfe könnte zu einer Insuffizienz dieser Augenbewegungen führen, da dann Amplitude sowie Zeitfolge der Fluktuationen für eine effektive Informationslieferung zu gering sind. Folge da-

von wäre eine Abnahme der dynamischen Akkommodationsantwort.

Die Gestalt der Testzeichen beeinflusst in dieser Arbeit die Ergebnisse nur unwesentlich.

Die unterschiedlichen Werte zwischen einzelnen Testpersonen sind wahrscheinlich durch persönliche Konstanten determiniert. Intelligenz des Einzelnen, Ermüdungstendenzen sowie mehr oder weniger schnelle Einstellung eines Lerneffektes sind einige dieser offensichtlich wichtigen Einflüsse.

Die Kenntnis über das Kontrastverhalten eines Testzeichens läßt die Annahme zu, daß es bei zunehmender Unschärfe bevorzugte Strukturen gibt, die als tatsächlicher Akkommodationsstimulus wirken. Betrachtet man die Originalschwärzungskurven (Abb. 5a-c, in Abb. 12 schematisierte Schwärzungskurve), so bieten sich zwei kontrastliefernde Kurvenabschnitte an: die Kanten der Kurven (Abb. 12:1,3) oder der lineare Steigungsbereich (Abb. 12:2). Beide Parameter sind unabhängig von der Schwärzungsamplitude dS (trotzdem kann diese nur bis zu einem bestimmten Wert klein werden, um einen Kontrast und damit einen Akkommodationsreiz zu ermöglichen).

Einige Klarheit könnte in dieser Frage die Betrachtung des retinalen Kontrastmechanismus schaffen: Wie bekannt, sind die physiologischen Grundlagen des Kontrastsehens einerseits antagonistische Feldorganisationen, andererseits die reziproke Schaltung der beiden hell- ("on"-) bzw. dunkel- ("off"-) meldenden Neuronensysteme B und D. Das B-System arbeitet dabei mit lateraler Hemmung und zentraler Aktivierung, das D-System umgekehrt.

Der Wirkmechanismus dieser Neuronensysteme und ihrer rezeptiven Felder wird optimiert, indem der Simultankontrast,

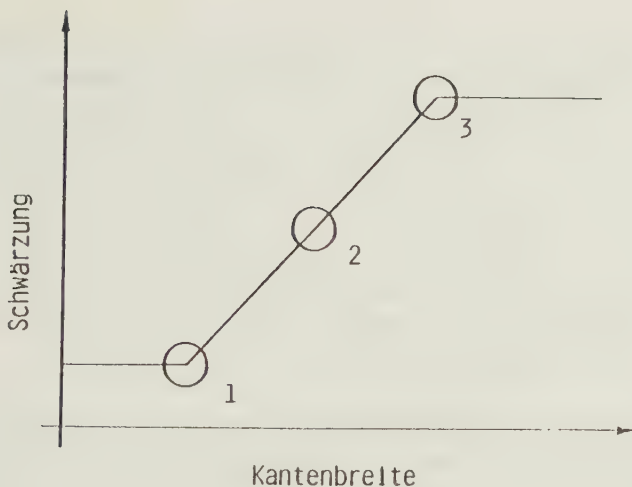


Abb. 12 schematische Schwärzungskurve; die eingekreisten Bereiche zeigen die als Akkommodationsstimulus in Betracht kommenden Kurvenabschnitte an:
 1 und 3 : Kanten der Kurven
 2 : linearer Steigungsbereich

d.h. der räumliche Kontrast zum Umfeld, und mit ihm der Grenzkontrast vergrößert wird. Dieser Grenzkontrast - als MACH-Phänomen bekannt - beruht auf einer Konturenverstärkung an der Grenze heller und dunkler Areale aufgrund räumlicher Wechselwirkungen innerhalb der Retina. Der helle Grenzbereich wird "heller", der dunkle "dunkler" gesehen. Neuronale Grundlage sind erhöhte Nervenzellentladungen an den Kontrastgrenzen, bei on-Neuronen durch reduzierte laterale Inhibition bzw. bei den off-Neuronen durch verminderte zentrale Hemmung mit vermehrter lateraler Aktivierung. Folge davon sind Aktivierungsmaxima und damit eine Verschärfung der Randkontrastinformation.

Dieser Grenzkontrast kann nicht im Steigungsbereich, son-

dern nur an den Kanten der Schwärzungskurve (Abb. 12:1,3) wirken, verstärkt dort aber eine bereits vorliegende, bessere Stimulierung des rezeptiven Feldes. Das Umfeld eines rezeptiven Feldes im Steigungsbereich unterliegt den negativen Auswirkungen einer ambivalenten, neuronalen Aktivierung: So tritt z.B. beim on-Zentrum auf der dunklen Seite des Umfeldes eine erhöhte laterale Hemmung ein, auf der helleren Seite jedoch genau das Gegenteil (eine laterale Aktivierung). Auf diese Patt-Situation hin ändert das Zentrum seine Aktivität nicht.

Die Bevorzugung des Kantenbereiches als Fixationspunkt könnte u.a. die Akkommodationsdrift erklären. Zunehmende Unschärfe führt zu Reduzierung und Aufheben des MACH-Phänomens und damit der Kontrastinformation, was eine Einstellung geringerer Akkommodationswerte mit sich bringt. Die ebenfalls mit zunehmender Unschärfe verbundene geringere Steigung würde am Verhalten eines rezeptiven Feldes, aus denselben Gründen wie oben aufgeführt (ambivalente neuronale Aktivierung), keine Veränderung bewirken. Auch eine Änderung der absoluten Lichtstärken, wie sie bei der Steigung durch den Aufbau verschiedener Grauzonen entsteht, spricht nicht für den Steigungsbereich als Stimulus, da der Sehvorgang durch relative Leuchtdichteunterschiede bestimmt wird.

Somit dürfte der Kantenbereich einer Schwärzungskurve im Vergleich zum Steigungsbereich einen höheren Stellenwert als Stimulus besitzen.

Als Fazit für die Praxis kann zusammengefaßt festgestellt werden, daß bei zunehmender Unschärfe die Akkommodationsgüte ab- und eine initiale Sollwertabweichung im Sinne einer Akkommodationsdrift zunimmt. Die Verunschärfung von Strukturen führt zu einer Unterakkommodation mit dem zusätzlichen Effekt einer weiteren, akkommodativ bedingten

Unschärfe. Eine Unschärfe von Sehzeichen, die über das Auflösungsvermögen des Auges hinausgeht, sollte also vermieden werden.

5. Zusammenfassung

In der Praxis liegen mehr oder weniger unscharfe (Testzeichen-) Strukturen vor, die die Akkommodation des menschlichen Auges beeinflussen. In einem subjektiv-dynamischen Meßverfahren wurden einem Betrachter reale Testzeichen in unterschiedlichen Unschärfestufen mon- und binokular dargeboten. Die Experimente führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Der verlangte Sollwert wird bei möglichst kleinem Akkommodationsaufwand nur in verschiedenem Ausmaß, aber nie vollständig erreicht. Trotz einer geringeren Akkommodationsleistung als der zu erwartenden wird das Testzeichen scharf wahrgenommen.
2. Das menschliche Akkommodationssystem reagiert auf Unschärfen des Sehzeichens sehr empfindlich: Schon eine geringe Unschärfe führt zu einer Drift der Akkommodation in Richtung der Akkommodationsruhelage. Dabei findet in Analogie zu anderen Bereichen der Wahrnehmung bei progredienter Verunschärfung eine kontinuierliche Reduktion der Akkommodationsantwort statt. Die resultierende Unterakkommodation bedingt eine weitere Verunschärfung des Retinabildes der Testzeichen.
3. Die Gestalt der Testzeichen unterliegt in größeren Unschärfebereichen gewissen Formveränderungen, beeinflusst jedoch Sollwertabweichung und Akkommodationsdrift nicht. Im Gegensatz dazu zeigt die Testzeichenentfernung deutliche Auswirkungen auf beide Phänomene und ist damit praxisrelevant. Eine Annäherung der Testzeichen an den Ruhelagebereich und damit eine Reduzierung der Akkommodationsanforderung führt zu höherer Einstellgenauigkeit und geringerer Driftbewegung.
4. Subjektive Komponenten beeinflussen wahrscheinlich die

Jeweilige Einstellung des Akkommodationswertes und verstärken die bekannten Erscheinungen. Ein größerer Teil normaler Beobachter ist akkommodationsfaul und nutzt das Vorhandensein eines mentalen Erkennungsverlangens als Informationslieferant aus.

5. Retinale Kontrastmechanismen sowie Mikrofluktuationen der Akkommodationseinstellung liefern bei progredienter Unschärfe immer unzureichendere Regelsignale zur exakten Einstellung der Akkommodation und werden insuffizient. Die Ausprägung des Funktionsverfalls hängt dabei vom Kontrastverhältnis sowie dem Kontrastgradienten der betrachteten Strukturen ab.

6. Literatur

1. ALLEN, M.J.: The stimulus to accommodation
Am. J. Optom., 32 (1955) 422-431
2. ALPERN, M.: Variability of accommodation during
steady fixation at various levels of
illuminance
J. Opt. Soc. Am., 48 (1958) 193-197
3. ALPERN, M.: Accommodation and the pupil
In: DAVSON, H. (Hrsgb.): The Eye, Bd.3
Academic Press Inc. Ltd., New York 1969
4. ALPERN, M. und DAVID, H.: Effects of illuminance
quantity on accommodation of the eyes
Ind. Med. Surg., 27 (1958) 551-555
5. FOUR, L.J.: The influence of the spatial distribu-
tion of a target on the dynamic response
and fluctuations of the accommodation of
the human eye
Vision Res., 21 (1981) 1287-1296
6. CAMPBELL, F.W.: The accommodation response of the
human eye
Brit. J. Physiol. Optics, 16 (1959)
188-203
7. Campbell, F.W., ROBSON, J.G. und WESTHEIMER, G.:
Fluctuations of accommodation under
steady viewing conditions
J. Physiol., 145 (1959) 579-594
8. CHARMAN, W.N. und TUCKER, J.: Dependence of accom-
modation response on the spatial fre-
quency spectrum of the observed object
Vision Res., 17 (1977) 129-139
9. CHARMAN, W.N. und TUCKER, J.: Accommodation as a
function of object form
Am. J. Optom. Physiol. Opt., 55
(1978) 84-92
10. CRANE, H.D.: A theoretical analysis of the visual
accommodation system in humans
Stanford Research Institute, Proj. 5454
(1966)

11. FINCHAM, E.F.: The accommodation reflex and its stimulus
Brit. J. Ophthalm., 35 (1951) 381-393
12. FINCHAM, E.F.: Factors controlling ocular accommodation
Brit. Med. Bull., 9 (1953) 18-21
13. FINCHAM, E.F. und WALTON, J.: The reciprocal action of accommodation and convergence
J. Physiol., 137 (1957) 488-508
14. FRY, G.A.: The blur of the retinal image
The Ohio State University Press, Columbus 1955
15. GAUER, O.H., KRAMER, K. und JUNG, R.: Physiologie des Menschen; Bd.13, Sinnesphysiologie 3 Sehen
Urban und Schwarzenberg, München, Wien, Baltimore 1978 (1.Auflg.)
16. GRIMM, W. und MANNECK, E.: Subjektive Refraktionsbestimmung mit dem Laserrefraktometer der Augenoptiker, 3 (1977) 7-17
17. HAMERLY, J.R. und DVORAK, C.A.: Detection and discrimination of blur in edges and lines
J. Opt. Soc. Am., 71 (1981) 448-452
18. HEATH, G.G.: Components of accommodation
Am. J. Optom., 33 (1956a) 569-579
19. HEATH, G.G.: The influence of visual acuity on accommodative responses of the eye
Am. J. Optom., 33 (1956b) 513-524
20. HENNESSY, R.T. und LEIBOWITZ, H.: Subjective measurements of accommodation with laserlight
J. Opt. Soc. Am., 60 (1970) 1700-1701
21. ITTELSON, W.H. und AMES, A.: Accommodation, convergence and their relation to apparent distance
J. Psychol., 30 (1950) 43-62
22. IVANOFF, A.: Chromatic aberration of the eye
Doc. Ophthalmol., 3 (1949) 322-333
23. KNOLL, H.A.: Measuring ametropia with a gas laser
Am. J. Optom., 43 (1966) 413-418

24. KRUEGER, H.: Untersuchungen zum Konvergenz-Akkommodations-Pupillen-Regelkreis des menschlichen Auges mit einem kontinuierlich aufzeichnenden Pupillo- und Akkommodometer
Diss. Universität München 1968
25. KRUEGER, H.: Schwankungen der Akkommodation des menschlichen Auges bei mon- und binokularer Beobachtung
Albrecht. v. Graefes Arch. klin. exp. Ophthalm., 205 (1978) 129-133
26. KRUGER, P.B.: The effect of cognitive demand on accommodation
Am. J. Optom. Physiol. Opt., 57 (1980) 440-445
27. KURTEV, A. und LAYTON, A.: Letters to the editor
Am. J. Optom. Physiol. Opt., 56 (1979) 277-278
28. LUDLAM, W.M.: Accommodative responses to small changes in dioptric stimulus
Am. J. Optom., 45 (1968) 483-506
29. MORGAN, M.W. und OLMSTEAD, J.M.: Quantitative measurements of relative accommodation and relative convergence
Proc. Soc. Exp. Biol. Med., 41 (1939) 303-307
30. MÜTZE, K.: ABC der Optik
Werner Dausien, Hanau/Main 1972
31. OWENS, D.A.: A comparison of accommodative responsiveness and contrast sensitivity for sinusoidal gratings
Vision Res., 20 (1980) 159-167
32. PHILLIPS, S. und STARK, L.: Blur: A sufficient accommodative stimulus
Doc. Ophthalmol., 43 (1977) 65-89
33. SCHMIDT, R.F. und THEWS, G.: Physiologie des Menschen
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1980 (20. Auflg.)
34. SCHÖBER, H.: Das Sehen
Bd.1, Leipzig 1960
Bd.2, Leipzig 1964 (3. Auflg.)

35. SCHRÖDER, G.: Technische Optik
Vogel, Würzburg 1974 (2.Auflg.)
36. SINCLAIR, D.C.: Demonstration of chromatic aberration in the eye using coherent light
J. Opt. Soc. Am., 55 (1965) 575-576
37. SMITHLINE, L.M.: Accommodative response to blur
J. Opt. Soc. Am., 64 (1974) 1512-1516
38. STARK, L. und TAKAHASHI, Y.: Absense of an odd-error signal mechanism in human accommodation
IEEE Trans. Bio.-Med. Eng. BME, 12 (1965) 138
39. TOATES, F.M.: A model of accommodation
Vision Res., 10 (1970) 1069-1076
40. TOATES, F.M.: Accommodation function of the human eye
Physiol. Rev., 52 (1972) 828-863
41. WARSHAWSKY, G.: The focusing servomechanism of the human eye
Ph.D. thesis, North Western University
1963
42. WESTHEIMER, G.: Focusing responses of the human eye
Am. J. Optom., 43 (1966) 221-232
43. YAMADE, S. und HUKAMI, K.: Visual acuity with short exposure time
Folia Ophthalmol. Jpn., 31 (1980) 890-893

Herrn Professor Dr. rer. nat. Dr. med. H. Krueger danke ich für die Überlassung des interessanten Themas, besonders auch für die tatkräftige und unermüdliche wissenschaftliche Unterstützung.

Danken möchte ich auch Herrn Dr.-Ing. J. Hessen sowie Frau Wachsmann für die konstruktive Hilfestellung während der Arbeit.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Andreas Korge
Geburtstag: 26.09.1958
Geburtsort: Konstanz/Bodensee
Vater: Wolfgang Korge, Dipl.-Ing. (FH)
Mutter: Gudrun Korge, geb. Löser
Dipl.-Sekretärin
Familienstand: ledig

Werdegang

Volksschule: 1964-1969
Konstanz und Germering
Gymnasium: 1969-1978
Humanistisches Karlsgymnasium,
München
26.06.1978 Abitur
Universität: Nov. 1978 Beginn des Studiums
der Humanmedizin an der Ludwig
Maximilians-Universität in Mün-
chen
August 1980 Ärztliche Vorprüfung
August 1981 1. Teil des Medizinischen
Staatsexamens
01.09.1981 Beginn der Dissertation



